

Was bringt die „Tiefe Geothermie“ im Bereich von Niederenthalpie-Lagerstätten?

Tiefe Geothermie ist die Nutzung von Wärme aus Tiefen über 400 m unter Geländeoberkante. Niederenthalpie-Lagerstätten sind Wärmereservoire bis 400 °C.

Ein Artikel von Daniel Wetzel (Welt, 28.08.2023) zur Nutzung von Erdwärme, den der Autor mit der Frage

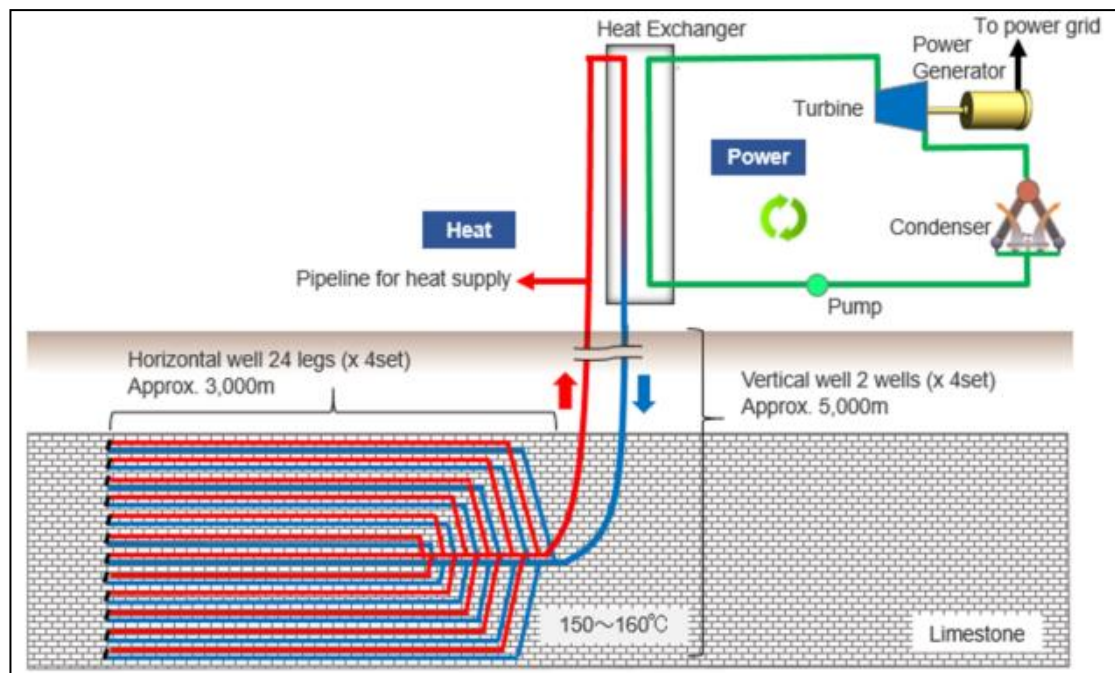
- Unerschöpfliche Öko-Energie, sauber, überall nutzbar – kann das wirklich sein? - beginnt, erfordert ein eindeutiges Nein! Es kann nicht sein.

Im konkreten Falle betrifft es das Geothermie-Projekt in Geretsried (Bayern, südl. München).

Begründung des **Nein!**

1. Kurzbeschreibung des Vorhabens:

Außer dem folgendem Anlagenschema und einigen Leistungsangaben stehen mir keine Projektangaben zur Verfügung. Deshalb hat die mathematisch, thermodynamische Betrachtung solcher Anlagen bzw. Projekte allgemeine Gültigkeit.



Die Anlage ist ausgelegt zur dauerhaften Verfügungsstellung von:

- 64 MW thermischer Energie (Wärme)
- 8,2 MW Elektroenergie (Strom).
- Die Bohrtiefe beträgt ca. 4.500 m unter Geländeoberkante

Die Kosten sind veranschlagt mit 250 Mio. EUR, darunter 91,6 Mio. aus dem Europäischen Innovationsfonds.

Von der ausführenden Firma wird die Anlage als Meilenstein zur Energiewende betrachtet, da scheinbar in großer Tiefe unerschöpfliche Energievorräte vorhanden sind.

Der Druck des darüber liegenden Deckgebirges auf das aufgefächerte Rohrsystem beträgt je nach Gesteinsart bei Kalkstein, Gneis oder Granit (Dichte 2,7 kg/m³) ca. 1.215 bar und bei Basalt (Dichte 3.1 kg/m³) ca. 1.395 bar. Die Temperatur beträgt in dieser Tiefe ca. 150 °C bzw. bei Basalt ca. 170°C.

2. Kurze Funktionsbeschreibung

Laut Schema erfolgt der Wasserumlauf im Rohrsystem nach dem „Thermosiphon-Effekt“. Es werden daher keine Umwälzpumpen benötigt, weil wegen der Dichtedifferenz von kälterem und Wasser höherer Temperatur der Kreislauf unbegrenzt aufrecht erhalten bleibt. Aus dem Schema ableitbare mögliche Betriebsparameter wären die Temperatur von 75 °C für Kaltwasser (Warmwasser) und 145 °C für Heißwasser. Es ergibt sich daraus ein Antriebsdruck für den Wasserumlauf von 29,6 bar als Grenzwert für den Druckabfall im Rohrsystem insgesamt.

Oberflächlich betrachtet steht uns damit ein scheinbar unbeschränktes Energiereservoir mit einem Wärmeinhalt Q_∞ weltweit zur Verfügung, das kostengünstig nutzbar wäre, wenn die Bohrkosten dem nicht entgegenstehen würden. Hierzu geben die Patentschriften DE112020007431T5 und DE112021004675T5 sowie die Gebrauchsmusterschriften DE202020005988U1 und DE202021004372U1 über „System zur Ausgestaltung von Bohrlöchern in einer geologischen Formation“ und „Kühlung für Geothermiebohrung“ einen orientierenden Überblick.

Ein anderer einschränkender Faktor ist die Natur selbst. Natürliche Systeme streben immer geordneten Verhältnissen zu, d.h. möglichst hoher Stabilität. Höchste Stabilität (perfekte Ordnung) ist gleichzusetzen mit dem Zustand geringstes Energieniveau. Im vorliegenden Fall wird durch Zuführung von Wasser niedriger Temperatur dem System permanent Wärme entzogen. Die Folge ist ein Temperatúrausgleich zwischen Rohrsystem und Umgebung. Dieser Ausgleich findet nur dann nicht statt, wenn durch Wärmeleitung im umgebenden Gestein die Temperatur konstant gehalten wird. Was bei Felsgestein als schlechtem Wärmeleiter sehr fragwürdig ist. Es ist die proportionale Abhängigkeit der zu erwartenden Leistung eines Geothermieprojektes von der Wärmeleitfähigkeit bzw. der Wärmestromdichte der liefernden Umgebung zwingend zu beachten. Diese Parallelität ist entscheidend.

3. Physikalische Grundlagen

Ist die Temperatur der Systemumgebung nicht konstant, handelt es sich um ein Problem der instationären Wärmerleitung. Die sich bildenden Temperaturfelder sind zeitlich und lokal abhängig, d.h. von der Zeit τ und den Ortskoordinaten x (quer zur Rohrachse) und z (längst der Rohrachse).

Das Temperaturfeld in einer homogenen und isotropen (konstante Entropie) Masse mit konstanten Stoffwerten kann in seinem örtlichen und zeitlichen Verlauf durch die Differenzialgleichung

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{\Phi_E}{\rho c}$$

von Fourier beschrieben werden. Der mathematische Aufwand zur Lösung der Gleichung wird geringer, wenn die Ortsordinate z unberücksichtigt bleibt. Da keine Wärmequelle vorhanden ist entfällt das zweite Glied und die Gleichung nimmt die einfachere Form an

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}.$$

Der Faktor a steht als Temperaturleitkoeffizient für die Stoffkonstantenkombination

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}.$$

Es bedeuten λ die Wärmeleitfähigkeit, ρ die Dichte und c_p die spezifische Wärme.

Ein möglicher Lösungsweg wird gefunden durch Betrachtung und Auswertung der Rand- und Anfangsbedingungen. Der allgemeine Lösungsansatz lautet dann

$$t_{(x,\tau)} = A + Bx + C \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_{t=0}^{\xi} e^{-\xi^2} d\xi .*$$

Die dimensionslose Größe ζ vereint die Variablen x und τ zu einer neuen Variablen.

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{4a\tau}}$$

Zur Bestimmung der Faktoren A, B und C folgt aus den Grenzwertbedingungen für:

- $x = 0$ wird $\zeta = 0$ und damit das Integral ebenfalls 0, es folgt $t = A = t_0$.
- $\tau = 0$ wird $t = t_a = \text{konstant}$ für alle x und
- $\tau = 0$ wird $\zeta = \infty$.

Das Integral $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} e^{-\xi^2} d\xi \equiv \Phi(\zeta)$ ist das Fehlerintegral von Carl Friedrich Gauß.

Seine Größe, d.h. den Wert für Φ in Abhängigkeit von ζ ist in mathematischen Tafeln höherer Funktionen zu finden z.B. Jahnke-Emde. Unter anderem auch in Wikipedia unter Standardnormalverteilungstabelle.

Für $\zeta = \infty$ wird der Integralwert gleich Eins. Es folgt

$$t(x, \tau) = A + Bx + C \cdot \Phi(\xi)$$

Für $t_a = \text{konstant}$ folgt $x = 0$ und damit $B = 0$, somit wird $C = t_a - t_0$.

Mit der sich aus der Betrachtung der Grenzwertbedingungen ergebenden Gleichung

$$t = t_0 + (t_a - t_0) \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} e^{-\xi^2} d\xi = t_0 + (t_a - t_0) \cdot \Phi \cdot \left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} \right)$$

kann jetzt die Temperatur im umgebenden Temperaturfeld (Felsen bzw. Erdreich) an jeden Punkt x und zu jeder Zeit τ berechnet werden.*

4. Beispiel zum Temperaturverlauf

Mit den oben genannten Temperaturen 145 °C im Vorlauf und 75°C im Rücklauf lassen sich die Temperaturfelder in der Umgebung des Rohrsystems zeitabhängig berechnen. Das unterirdisch aufgefächerte Rohrsystem entsprechend oben stehendem Schema ist pro Satz ca. 88.200 m lang und der sich ergebende optimale Durchmesser beträgt 65 - 70 mm. Der aus der angenommenen Ausführung ermittelte Druckverlust (inklusive Armaturen) von ca. 20,6 bar bei 65 mm lichtigem Rohrdurchmesser liegt unter dem durch die Dichtedifferenz des Wassers gegebenen Grenzwert von 29,6 bar.

Die Umgebungstemperatur des Rohrsystems beträgt zu Beginn der Entnahme von Wärme konstant ca. 150 °C und wird im Laufe des Betriebs sinken, wenn in Richtung Rohrleitung nicht genügend Wärme durch Wärmeleitung in der Umgebung nachströmt.

Aus der Rechnung am Rohranfang (75 °C) und am Rohrende (145 °C) in Abständen von einem bis sechs Meter folgen die in den Diagrammen 1 und 2 dargestellten Temperaturen im Zeitraum von einer Woche bis vier Wochen.

Da Felsgestein wie Kalkstein, Gneis, Granit, Basalt u.a. schlechte Wärmeleiter sind, erfolgt der Temperaturabfall schon nach relativ kurzer Betriebszeit.

R^2 ist das Bestimmtheitsmaß der im Diagramm dargestellten Graphen.

* Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Dr.-Ing. Norbert Elsner, TU Dresden Akademie – Verlag Berlin 1973, S. 499 ff

...bzw.

TECHNISCHE WÄRMELEHRE, Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Faltin, Mitglied der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Akademie – Verlag Berlin 1968, 5. Auflage, S. 296 ff

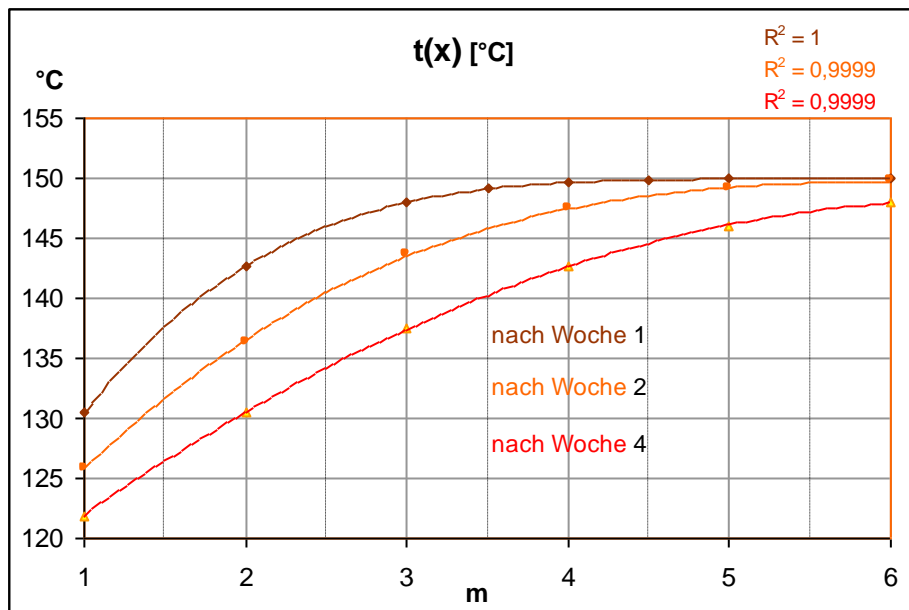


Diagramm 1: Temperaturen t im Abstand x quer vom Rohranfang

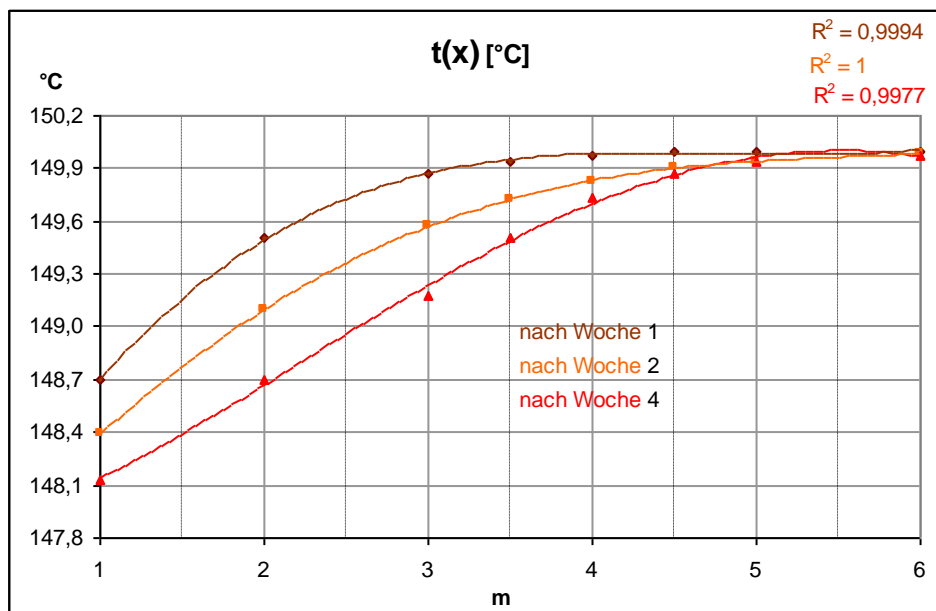


Diagramm 2: Temperaturen t im Abstand x quer vom Rohrende

Die in den Diagrammen dargestellten Ergebnisse lassen nur eine kurze Betriebszeit mit voller Leistung erwarten. Auf Grund fehlender Projektinformationen wurde die Zeitdauer der möglichen Betriebszeit nicht verfolgt.

Von Interesse ist daher der Wärmestrom in Richtung Rohrleitung im Abstand von 1 m. Die Temperatur am Rohranfang beträgt dort nach 24 h 146,7 °C und nach 48 h Betrieb 141,5 °C. Für das Rohrende ergeben sich 149,8 nach 24 h und 149,4 °C nach 48 h Betrieb, d.h. die Anlage liefert noch die erwartete thermische Leistung.

Aus der Gleichung**:

$$W = -\frac{2\lambda \cdot (t_a - t_0)}{\sqrt{a \cdot \pi}} \cdot (\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_1})$$

ergibt sich der Wärmestrom über die Zeit, dargestellt in den Diagrammen 3 und 4.

** Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Dr.-Ing. Norbert Elsner, TU Dresden Akademie – Verlag Berlin 1973, S. 502

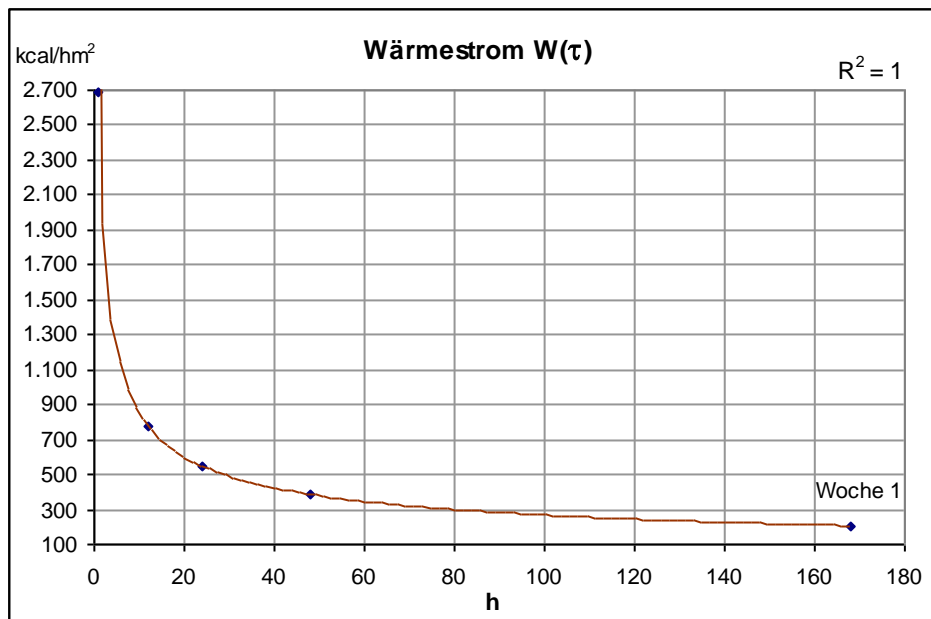


Diagramm 3: Wärmestrom $W(\tau)$ im Abstand 1 m quer vom Rohranfang

Der Wärmestrom kommt scheinbar aus dem Unendlichen, wird aber nach wenigen Stunden deutlich schwächer auf Grund der schlechten Wärmeleitung im Gestein. Es strömt weniger Wärme als entnommen nach. Die Umgebung des Rohrsystems kühlt ab. Siehe dazu Diagramm 1.

Analoge Verhältnisse bestehen am Rohrende nur zeitverschoben wegen der höheren Temperatur innerhalb der Leitung bei geringerem Wärmefluß auf Grund kleinerer Temperaturdifferenzen. Siehe dazu Diagramm 2.

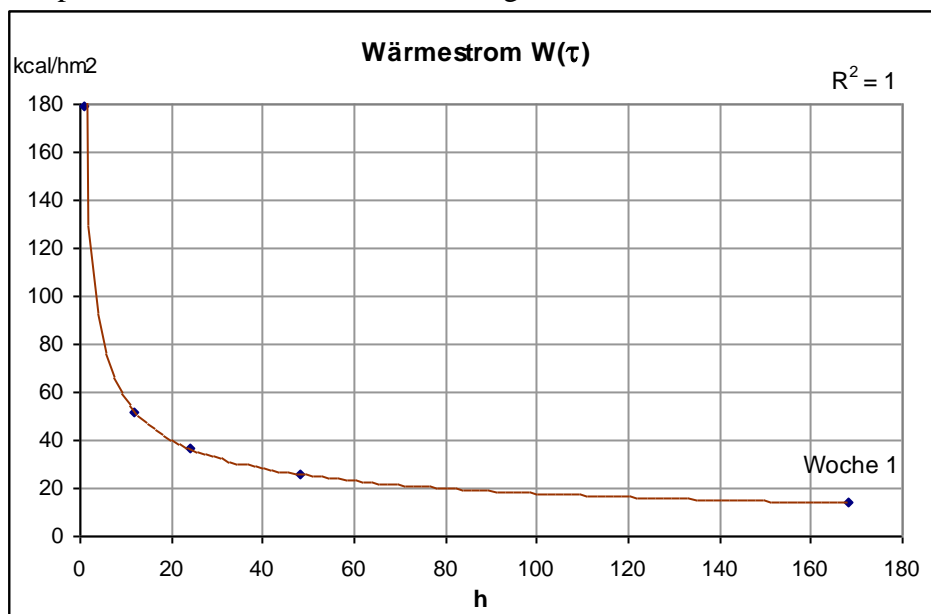


Diagramm 4: Wärmestrom $W(\tau)$ im Abstand 1 m quer vom Rohrende

Für die Übertragung der Wärmemenge von 16 MW pro Ausbaustufe reicht zu Betriebsanfang eine Oberfläche des Rohrsystems von ca. 1.600 m² aus. Die s entspricht ca. 660 m Länge pro Rohrschleife. Die maximale Länge einer Schleife beträgt 6.600 m. Schon nach ca. 10 - 12 h Betrieb ist die für die Leistungsvorgabe 16 MW_{th} vorhandene Leitungslänge von ca. 88.200 m mit ca. 87.000 m schon fast voll genutzt.

Der Leistungsabfall wird sich entsprechend dem in den Diagrammen 3 und 4 dargestellten Abfall des Wärmestroms sukzessive fortsetzen. Entsprechend wird auch die Leistung der Gesamtanlage sowohl thermisch als auch elektrisch gegen den Grenzwert Null sinken.

5. Fazit

Nicht nachvollziehbar sind die Aussagen über **Eavor-Loop™** seitens der Firma wie:

- **Wärmeaustrag über Jahrzehnte**

Vorhersehbarer und wirtschaftlicher Wärmeaustrag durch kontrollierte Wärmeentnahme und Einhaltung von Mindestabständen zwischen den Wärmeschleifen

- **Option 1:** Maximaler Wärmeaustrag:

Konstante Einstellung der Fließrate über 30 Jahre (Beispiel 60 l/s). Der Wärmeaustrag sinkt stärker während der ersten 6 Jahre, danach wird die Absenkung geringer und gleichmäßiger. Dies entspricht dem Betrieb der EavorLite Versuchsanlage, deren Temperaturverringerung bisher exakt der Prognose folgt.

- **Option 2:** Gleichmäßiger Wärmeaustrag:

Ein regulierter Anstieg der Fließrate im Zeitverlauf liefert einen gleichmäßigen Wärmeaustrag über 30 Jahre.

Dem steht entgegen, daß schon nach 168 h (1 Woche) Betrieb der Wärme fluß im Bereich Rohr bis 1 m Abstand am Rohranfang nur noch ca. 2,4 % des Erforderlichen beträgt. Am Rohrende sind es trotz der geringeren Temperaturdifferenzen ebenfalls ca. 2,4 %.

Für die Wärme übertragende Fläche bedeutet das, auf die Rohrlänge bezogen, sie müsste 40-mal größer sein als vorhanden.

Die angenommene Ausführung des Projektes als Rechenmodell kommt mit einer Fließrate von rechnerisch 57,2 l/s der als Beispiel genannten Rate 60 l/s s.o. recht nahe.

Autor: Dipl.-Ing. Uwe Detloff

Schnoienstr. 11 in 18273 Güstrow

uwe.e.e.detloff@t-online.de

Tel, 03843-2 77 80 86